基于HEC-RAS的露天转地下开采地表塌陷区径流入渗规律研究*

宋永亮[1]，兰舟[1]，朱智超[1]，文鑫[2]，张艺山[1,2]，赵永[2]，张妨[3]

（1.海南矿业股份有限公司， 海南 昌江黎族自治县 572799；
2.东北大学 资源与土木工程学院， 辽宁 沈阳 110819；
3.中冶北方（大连）工程技术有限公司， 辽宁 大连市 116600）

摘要：在露天转地下崩落开采过程中，随着上覆围岩变形破裂，其渗透性急剧增加，为强降雨入渗提供了通道，易诱发井下突水等灾害。为准确评估强降雨条件下塌陷区径流入渗量，以石碌铁矿为工程背景，提出了一种基于地表汇水入渗区精确划分的降雨入渗量计算方法，利用开源水力计算程序（Hydrologic Engineering Center's River Analysis System，HEC-RAS）圈定塌陷区外围汇水范围，结合地表塌陷变形及矿区地表汇水数值模拟结果，划分了不同开采状态下冒落带、导水裂隙带及径流区等入渗区域，分区域计算了暴雨条件下的降雨入渗量。结果表明，北一采场塌陷区径流入渗量由现状条件的182 874 m^3/d增加到开采完毕时的218 118 m^3/d，提高了19.3%。进一步划分了3个防渗等级区域，针对不同区域提出了防渗措施建议，其中，冒落带及导水裂隙带被积水淹没的区域为一级防渗区域，采用分层填充地裂缝、铺设防渗膜及抽水机抽排的综合防渗措施。研究结果可为矿山排水系统的设计及突水灾害的预防提供科学依据。

关键词：露天转地下开采；HEC-RAS；降雨入渗；地表汇水；防渗措施

中图分类号：TD803；TD742$^+$.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)05-0081-10

Study on Runoff Infiltration Law in Surface Subsidence Area During the Transition from Open-Pit to Underground Mining Based on HEC-RAS

Song Yongliang[1], *Lan Zhou*[1], *Zhu Zhichao*[1], *Wen Xin*[2], *Zhang Yishan*[1,2], *Zhao Yong*[2], *Zhang Fang*[3]

(1.Hainan Mining Co., Ltd., Changjiang Li Autonomous County, Hainan 572799, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
3.Northern Engineering & Technology Corporation, MCC, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: In the transition process of open-pit to underground caving mining, with the deformation and fracture of the overlying surrounding rocks, its permeability increases sharply, which provides channels for heavy rainfall infiltration and easily induces disasters such as underground water inrush. In order to accurately evaluate the runoff infiltration in the subsidence area under heavy rainfall conditions, taking Shilu Iron Mine as the engineering background, a calculation method of rainfall infiltration based on the accurate division of surface catchment infiltration area was proposed. Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) was used to delineate the catchment area outside the subsidence area. Combined with the numerical simulation results of surface subsidence deformation and surface catchment in the mining area, the infiltration areas such as caving zone, water-conducting fracture zone and runoff zone under different mining conditions were divided, and the rainfall infiltration under rainstorm conditions was calculated in different areas. The results show that the runoff infiltration in the subsidence area of the North No.1 stope increased from 182 874 m^3/d under the current condition to 218 118 m^3/d at the end of mining, with an increase of 19.3%. Three anti-seepage grade areas were further divided, and anti-seepage measures were proposed for different areas. Among them, the area where the caving zone and the water-conducting fracture zone were submerged by water was the first-level anti-seepage area, and the comprehensive anti-seepage measures of layered filling ground

* **收稿日期**：2025-05-24
基金项目：国家自然科学基金面上项目（52374157）；中国科协青年托举人才工程项目（2023QNRC001）；应急管理部重点科技项目（2024EMST080802）
作者简介：宋永亮（1971—），男，宁夏中宁人，高级工程师，主要从事金属矿采选方面的研究。E-mail：w1154477043@163.com
通信作者：赵永（1991—），男，山东临沂人，博士，副教授，主要从事岩体孕灾机理与灾变预警、地下工程稳定性评估等方面的研究。E-mail：zhaoyongrock@163.com

cracks, laying anti-seepage film and pumping were adopted. The research results can provide scientific basis for the design of mine drainage system and the prevention of water inrush disaster.

Key words: Transition from open-pit to underground mining, HEC-RAS, Rainfall infiltration, Surface catchment, Anti-seepage measure

0 引言

随着经济的发展和资源需求量的增加,浅部矿产开发已不能满足需要,许多矿山由露天开采转入地下开采。随着开采扰动,上覆围岩在诱导应力作用下发生变形、损伤与破裂,导致地表开裂沉陷,围岩完整性急剧降低,地下导水通道与地表连通,为强降雨、径流及周边水体入渗突水提供了良好的通道[1-2]。随着雨季强降雨入渗,地下涌水量急剧增加,极易引发突水、淹井及井下泥石流等灾害,严重威胁人员生命及财产安全。因此,对露天转地下矿山的降雨入渗规律进行分析,并定量评价降雨入渗量,对评估井下排水系统的排水能力以及井下开采的突水风险至关重要。

针对上述问题,相关学者开展了广泛的研究。在理论分析方面,唐宇[3]运用层次分析法从地质构造和水文地质条件等5个方面建立了采场突水突泥灾害的风险评价模型。付建新等[4]基于非饱和土中水的基本运动方程,建立了降雨在塌陷区上覆非饱和黄土层一维入渗数学模型。李光耀等[5]以二维非饱和土渗流控制方程为基础,推导了强降雨条件下单层土质覆盖层的入渗解析解,发现潜在滑动面的埋深越大,覆盖层稳定安全系数对降雨的响应速度越慢。范明星等[6]建立了一种以降雨量为输入数据的涌水量灰色GM(1,2)时序性预测理论模型。Zhan等[7]推导了无限长整体覆盖层的非饱和流解析解,并研究了降雨模式对渗透过程和深层渗流产生的影响。Feng等[8]推导了稳态非饱和无限斜坡中孔隙水压力的半解析解。在数值模拟方面,蔚波等[9]提取覆岩采动裂隙并导入COMSOL软件,构建了煤层过沟开采地表水入渗数值计算模型,研究了地表水通过采动裂隙与工作面之间的渗流特性。Paronuzzi等[10]通过数值渗透模型研究了由强降雨引起的均匀和分层崩积沉积物中的降雨渗透过程。李军强等[11]建立了矿区水文地质数值模型,并以此分析预测了矿山地下开采对矿坑涌水量的影响。刘敏等[12]提出了一个基于有限元求解器的非线性水力耦合模型,并分析了吸力弹性模量、饱和渗透系数以及边坡角度等对降雨汇水和入渗过程的影响,发现土壤饱和渗透系数增大会导致更大的降雨入渗量和土体变形。熊鹏等[13]对矿区不同开采年份、不同季节降雨量下的涌水量进行了预测分析,发现丰水期涌水量约为平水期的1.5倍,约为枯水期的2倍。侯晓萍等[14]对非饱和裂隙土降雨入渗特性进行数值模拟研究,描述了当降雨量大于裂隙土的渗透能力时雨水沿地表流走的现象。

综上可知,目前的研究多集中于降雨入渗引发突水过程的涌水量及机理研究,表明降雨主要通过优势导水通道进入地下采场进而引发突水事故。降雨入渗量的准确计算对于突水风险性评价具有重要意义,但现有研究尚未评估不同地表塌陷变形程度对变形区渗透特性的影响,也未考虑到降雨径流向塌陷区汇集后的入渗问题,导致当前降雨入渗量计算存在较大偏差。为此,本文以海南省石碌铁矿为研究对象,提出了一种基于地表汇水入渗区划分的降雨入渗量计算方法,利用开源水力计算程序(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, HEC-RAS)圈定塌陷区外围汇水范围,结合现场勘察和数值模拟等手段评估地表变形程度,进而划分冒落带及导水裂隙带。通过对不同区域设置不同降雨入渗系数,分区域计算暴雨条件下的降雨入渗量。研究结果可为矿山排水系统的设计及突水灾害的预防提供科学依据。

1 降雨入渗规律分析方法

1.1 HEC-RAS软件基本原理

HEC-RAS软件广泛应用于河流管理、防洪规划、复杂环境地表径流分析等领域,可进行一维恒定流,一、二维非恒定流分析等。一维恒定流分析模拟河流在稳定条件下的水流分布,主要用于计算水面线、过水断面及水工结构的水力特性(如闸门、堰、桥梁等),适合简单或常规的河流系统。一维非恒定流分析模拟随时间变化的水流动态特性及河流沿程的水位和流量变化,如洪水涨落、坝溃洪水等。二维非恒定流分析允许在水平面上进行更精确的水流分析,尤其适用于河道溢流或复杂地形的模拟(如河流

冲刷和洪水蔓延)，以及洪水风险区划、洪水淹没模拟。另外，HEC-RAS 软件支持二维和一维模型的联合分析，以解决复杂场景中河流主槽和泛洪平原的耦合问题。

本文主要使用二维非恒定流分析，HEC-RAS 二维水动力学模型的数值计算混合了有限体积法和有限差分法，可有效求解二维圣维南方程组或扩散波方程。该数值方法将划分的计算网格预处理为具有一系列源自空间数据的水力特性曲线的胞体，从而确定每个胞体内的高程-体积曲线，当胞体内计算的含水体积大于胞体体积时出现溢水。该模型对复杂地形条件下的降雨径流模拟具有较强的适用性，由于露天及地下开采主要体现为矿区地形的改变，因此该方法同样适用于矿区径流计算，且目前已有部分学者利用该软件对矿区径流进行了研究[15]，并取得了良好的效果。模型采用非结构化计算网格，不与边界相接的网格是正四边形，与边界相交的网格则采用不规则多边形以适应复杂边界，最多 8 条边。同时，网格支持局部加密和对齐。外边界条件包括水位、流量、水位-流量、正常水深(河床底坡)，内边界支持流量条件，其初始条件支持单一水位和全干河床。

HEC-RAS 软件中的水动力研究模块可对研究区流域开展降雨影响分析，实现稳定、快速的洪水淹没模拟。非恒定流模拟的计算公式采用连续性方程(见式(1))和动量方程(见式(2)和式(3))。

连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

式中：h 为水深，m；t 为时间，s；u、v 分别为水流在 x、y 方向上的流速，m/s。

x 方向动量方程：

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t}+\frac{\partial (hu^2+0.5gh^2)}{\partial x}+\frac{\partial (huv)}{\partial y}=\frac{-gh\partial z}{\partial x}-\tau_x \tag{2}$$

y 方向动量方程：

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t}+\frac{\partial (hv^2+0.5gh^2)}{\partial y}+\frac{\partial (huv)}{\partial x}=\frac{-gh\partial z}{\partial y}-\tau_y \tag{3}$$

式中：τ_x、τ_y 为河床底部摩擦力，N；g 为重力加速度，m/s^2。

曼宁公式贯穿整个水力计算，用于计算水流速度、流量等，见式(4)。

$$V=\frac{1}{n}R^{2/3}S^{1/2} \tag{4}$$

式中：V 为平均流速，m/s；n 为曼宁系数；R 为水力半径，即过水断面面积和湿周之比，m；S 为水力坡降，无量纲。

本文采用 HEC-RAS 软件，通过数值方法求解公式(1)至公式(4)，可得到暴雨条件下矿区地表径流中任一点的水深、水流流向及流速，进而为下文研究径流流向塌陷区的汇水量及防渗区域的划分提供数据支撑。

1.2　改进的降雨入渗计算方法

目前对塌陷区降雨入渗量尚无比较完善和成熟的计算方法，一般按照相关规范的要求采用参数系数法进行估算，估算公式如下。

$$Q=H_p\times F\times \alpha/1\ 000 \tag{5}$$

式中：Q 为设计频率暴雨时塌陷区径流入渗总量，m^3/d；F 为冒落带区域面积，m^2；α 为设计频率暴雨时冒落带区域入渗系数；H_p为设计频率的日暴雨量(24 h 暴雨量)，mm。

当前计算方法存在如下问题。

(1) 塌陷区面积圈定的合理性将直接影响到降雨入渗量估算的准确性。常规的塌陷区面积确定方法是根据错动角度及矿体的开采范围圈定地表相对应的塌陷区域，并将此区域面积作为降雨入渗量估算的塌陷区面积。但随着开采深度的增加，巨厚的盖岩使得地表塌陷模式、地压活动规律等出现不同于浅部地下开采的特征，因此统一依据错动角从最终开采下界向地表划分塌陷区域往往存在较大误差。

(2) 将整个塌陷区取同一个降雨入渗系数不合理。不同的塌陷变形程度会使岩石的渗透性能发生不同程度的改变，应根据不同塌陷变形程度赋予不同的降雨入渗系数。

(3) 对露天转地下开采矿山来说，降雨形成的地表径流会汇入露天采坑并发生入渗。这一部分入渗量受地表径流区面积的影响显著，当地表径流区面积足够大时，其入渗量甚至比塌陷区直接降雨入渗量更大。但当前计算中往往很难精确确定径流区范围，导致该部分水量计算存在较大误差。

为解决上述 3 个问题，本文提出了一种基于地表汇水入渗区精确划分的降雨入渗量计算方法。在矿山地下开采过程中，塌陷区会呈现典型的“三带”特征[16]，以采空区为中心区域，在水平方向上由里到外分别为冒落带、导水裂隙带及整体移动带，如图

1 所示。

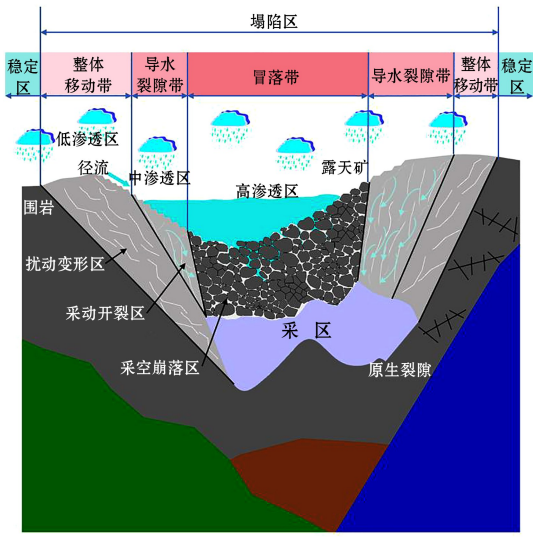


图 1 露天转地下开采矿山降雨入渗示意

Fig.1 Schematic of rainfall infiltration during the transition from open-pit to underground mining mines

冒落带是指采矿工作面放顶后引起矿层顶板的破坏范围。此范围的岩石完全失去了原有岩层的结构、构造和物理力学性能,呈不规则岩块或似层状岩块向采空区冒落,冒落带内岩块之间的空隙多、连通性强,使岩石的渗透性能急剧增加,是降雨入渗坑内的良好通道,该区域的降雨有较大一部分可直接入渗。

导水裂隙带一般处于冒落带和整体移动带之间,本带岩层产生新的破裂和离层,由于岩石的变形,岩层裂隙发育程度也相应增强,此带如果发展到地表,也会成为大气降水入渗坑内的良好通道,从而使得该区域的降雨也有相当一部分可直接入渗。

整体移动带因岩层下部支撑力减少,在自重作用下产生了塑性弯曲或整体缓慢下沉,该带岩层结构变化不大,渗漏能力变化较小,因此该区域降雨主要形成地表径流。

因此塌陷区降雨入渗量主要有三个来源,一是降雨直接通过冒落带的入渗量,二是降雨直接通过导水裂隙带的入渗量,三是降雨在塌陷区周边形成径流流向塌陷区的入渗量。最终得到降雨入渗量计算公式为:

$$Q=H_p\times F_1\times\alpha_1/1\ 000+H_p\times F_2\times\alpha_2/1\ 000+H_p\times F_3\times\alpha_3\times\phi/1\ 000 \tag{6}$$

式中:F_1为冒落带区域面积,m^2;F_2为导水裂隙带区域面积,m^2;F_3为塌陷区外围汇水面积,m^2;α_1为设计频率暴雨时冒落带区域入渗系数;α_2为设计频率暴雨时导水裂隙带区域入渗系数;α_3为设计频率暴雨时塌陷区外围汇水径流进入塌陷区域入渗系数;ϕ为地表径流系数。

1.3 降雨入渗规律分析步骤

本文将降雨入渗规律分析步骤分为了以下 4 步,如图 2 所示。

(1) 基于水力计算程序 HEC-RAS 进行地表汇水模拟,得到降雨条件下地表塌陷区的径流汇水情况,划分塌陷区外围汇水范围。

(2) 利用现场勘察和数值模拟等手段评估不同开采进程下地表变形程度,根据变形程度大小划分冒落带及导水裂隙带范围,剩余的汇水范围即为径流区范围。

(3) 参考相关规范,对步骤(1)和步骤(2)所得各降雨入渗区按区域进行径流系数与降雨入渗系数的赋值。

(4) 基于上述得到的降雨入渗区域范围及系数,利用式(6)计算不同开采进程下塌陷区降雨入渗量,完成对地表塌陷区降雨入渗规律的分析。

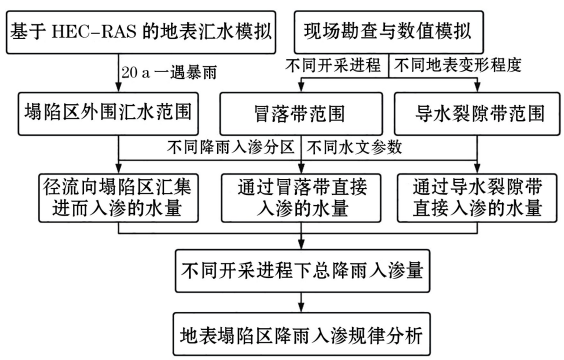


图 2 降雨入渗规律分析步骤

Fig.2 Steps of rainfall infiltration pattern analysis

2 工程背景

2.1 矿区开采现状

石碌铁矿位于海南省西部的昌江黎族自治县石碌镇境内,是我国少有的高品位露天转地下开采矿山。研究区属中低丘陵区,丘陵区剥蚀波状平原,地形呈波状起伏,地面标高为 40～200 m,局部低洼地段小于 40 m,地表坡度为 3°～5°,局部地段坡度为 5°～10°。低山丘陵区标高为 200～1 000 m,地形坡度为 10°～25°,部分山坡较陡,坡度大于 30°,山多林密,研究区地表如图 3 所示。研究区中北一采场于 1957 年投产,开采方式为露天开采,2017 年底露天开采结束,开采最低底板标高为 0 m,现已转为地下开采。露天采坑东西长为 1.50 km,南北宽为 0.46 km,

露天境界台阶高度为 12 m，封闭圈标高为 168 m。

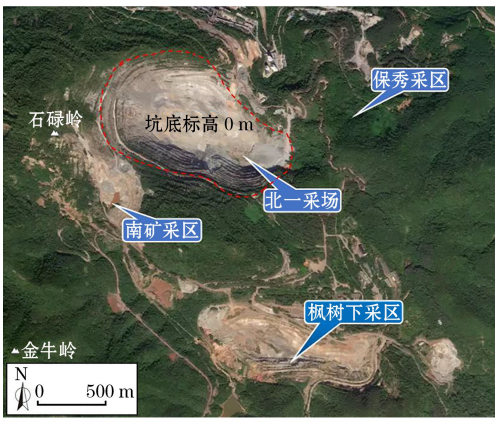


图 3　研究区地表

Fig.3　Surface of study area

北一采场主要开采深度为 0～－360 m 的矿体，采矿方法为无底柱分段崩落采矿法，开拓系统为主副井斜坡道联合开拓。矿山开采规模为 480 万 t/a，露天转地下开采示意图如图 4 所示，截至 2024 年年底，北一采场已采至－75 m 水平。目前北一采场露天坑底覆盖层已经形成，采场局部边坡已经垮塌，地表已形成塌陷区。井下排水采用一段式排水，水仓、水泵房布置在－360 m 水平进风井附近，排水管设在进风井内。各阶段井下涌水和矿山生产废水经阶段运输水平巷道内水沟及泄水井汇入井下－360 m 水平水仓内，经水泵排至 84 m 水平泄洪平巷。

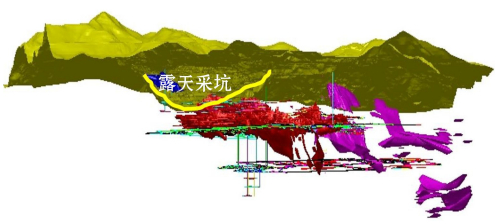


图 4　北一采场露天转地下开采示意

Fig.4　Schematic of the transition from open-pit to underground mining in North No.1 stope

2.2　矿区水文地质情况

研究区地处热带，属热带海洋季风气候，终年无霜雪冰冻，雨量较充沛，近 20 a 年均降雨量为 1 700 mm，每年 5 月至 11 月为雨季，其中 6 月至 10 月，属台风季节，雨量集中，12 月至翌年 4 月为旱季。年蒸发量为 1 630.5 mm。北一采场水文地质条件属简单类型，地下水类型主要为构造裂隙水和风化裂隙水，动储量和静储量均不丰富。地下水及水量变化与大气降雨关系密切，主要由大气降雨补给，与地表水无水力联系。

矿区属丘陵地貌，绝对高度为 619.80(金牛岭)～67.00 m(北部石碌河出口)，相对高度差为 552.80 m，最低侵蚀基准面标高为 67.00 m。矿体部份位于当地侵蚀基准面以下，矿区东、南、西分别为保秀岭、三棱山、枫树顶、羊角岭、金牛岭等一系列中低山峰形成的地表分水岭，北为石碌群第五层绢云母石英片岩及中生代印支晚期花岗闪长岩所围绕，由于地表分水岭所处地层主要为透水性极差的片岩、千枚岩，加上北部亦为透水性极差地层，导致矿区与区域地下水发生水力联系的可能性较小，自身构成一个独立的水文地质区，该地质区又可分为几个独立的水文地质单元，如图 5 所示。

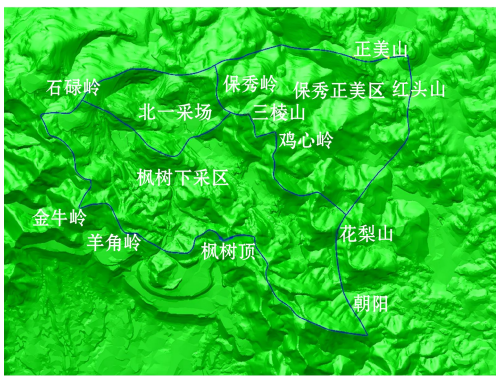


图 5　矿区水文地质单元分布

Fig.5　Distribution of hydrogeological unit in mining area

3　基于 HEC-RAS 的矿区地表汇水模拟

3.1　高精度地表 DEM 模型建立

为确保地表模型足够精确，本次汇水模拟所用地表数字高程(Digital Elevation Model，DEM)模型需用无人机倾斜摄影，得到的石碌铁矿地表模型如图 6 所示，涵盖了矿区地表汇水分析所需分水岭信息，扫描结果可作为高精度地表 DEM 模型的主体部分，缺少的部分用卫星高程数据补齐，最终得到的地表 DEM 模型如图 7 所示。

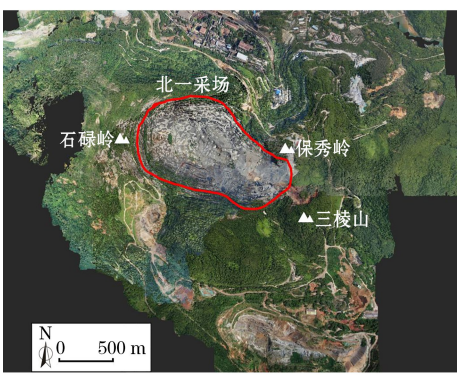


图 6　石碌铁矿地表模型

Fig.6　Surface model of Shilu Iron Mine

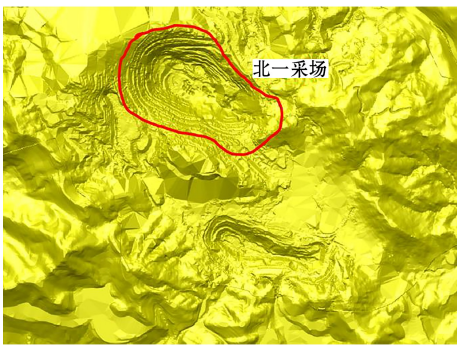


图 7 地表 DEM 模型

Fig.7 Surface DEM model

3.2 汇水模拟参数设置及汇水计算结果

将前述 DEM 模型导入软件后,生成的现状条件下降雨汇水模型如图 8 所示,设置二维网格的空间步长为 10 m,网格数量为 112 416 个,曼宁系数(综合反映地面粗糙情况对水流影响的系数)取值为 0.06。

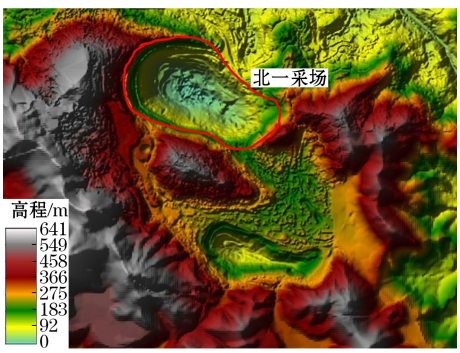


图 8 现状条件下降雨汇水模型

Fig.8 Rainfall catchment model under current conditions

划分网格之后,需根据实际情况设置相应边界条件。边界条件主要用于定义计算区域的入流与出流条件,初始条件则用于给出整个计算区域的初始状态。模型外边界主要包括两类,一是围绕二维模型外部边界设置的条件(如水位、流量、水位-流量、河床底坡等);二是布置在整个二维网格条件(如降水、水位等)。

本案例模型设置所有外边界为水流出口,设置水力坡度为 0.03,选取全局降雨为入流条件,根据《冶金矿山采矿设计规范》(GB 50830—2013)中规定,露天转地下开采大型矿山时设计暴雨频率为 5%,故本次考虑 20 a 一遇暴雨强度。连续降雨 3 d,设置最大单日降水量为 434.5 mm,模拟的降雨量曲线如图 9 所示。设置模拟计算间隔为 15 min,输出水力要素间隔为 15 min。

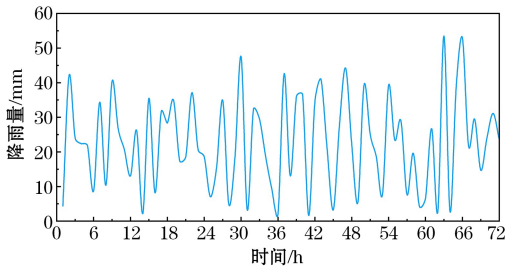


图 9 模拟的降雨量曲线

Fig.9 Simulated rainfall curve

最大积水深度随时间的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知,降雨开始后,坑底积水面积较小,最大积水深度迅速上升,随着时间的推移,水深上涨速度大幅减缓。降雨 36 h 时,北一采场最大积水深度为 34.2 m,积水面积为 192 654 m^2。降雨 72 h 时,北一采场最大积水深度为 45.7 m,积水面积为 207 536 m^2,相比于降雨 36 h,最大积水深度增大了 33.63%,积水面积增大了 7.72%。圈定降雨形成的径流向北一采场汇集的范围,作为塌陷区的外围汇水范围,汇水面积约为 1 725 692 m^2。最终得到矿区积水深度分布及塌陷区汇水范围,如图 11 所示。

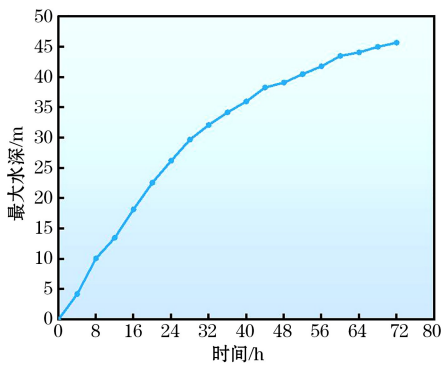
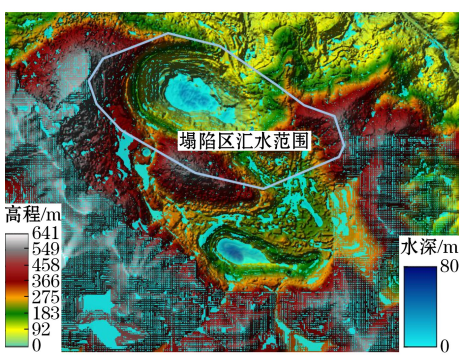
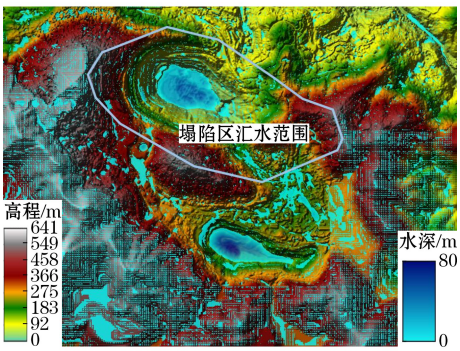


图 10 最大积水深度随时间的变化曲线

Fig.10 Variation curve of maximum waterlogging depth with time



(a) 降雨 36 h



（b）降雨 72 h

图 11　矿区水深分布情况及塌陷区汇水范围

Fig.11　Distribution of water depth in mining area and catchment range of subsidence area

4　暴雨条件下塌陷区降雨入渗量计算

对不同开采程度（现状条件和开采完毕条件）下的降雨入渗量进行计算，确定不同开采程度下各降雨入渗区范围及水文参数后，利用式(6)对暴雨条件下塌陷区降雨入渗量进行计算。

4.1　现状条件下塌陷区降雨入渗量计算

在开展现状条件下的塌陷区降雨入渗量计算时，首先需确定冒落带、导水裂隙带及径流区的范围。当前开采岩移状态下，通过现场实地勘测及三维激光扫描得出北一采场冒落带及导水裂隙带范围，扫描结果如图 12 所示。扫描得到冒落带区域面积约为 42 000 m^2，基本无导水裂隙带。根据 HEC-RAS 汇水模拟得到的汇水面积约为 1 725 692 m^2，则径流区面积为汇水面积减去冒落带区域面积，即径流区面积约为 1 683 692 m^2，降雨入渗区划分如图 13 所示。

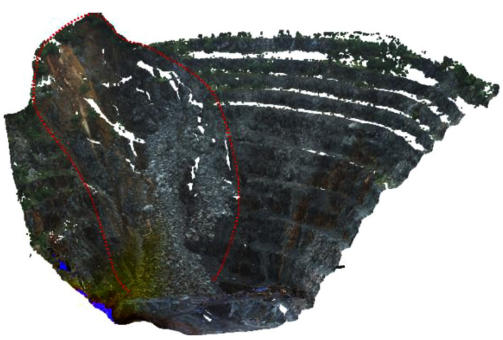


图 12　北一采场现状塌陷区激光扫描结果

Fig.12　Laser scanning results of the current subsidence area in North No.1 stope

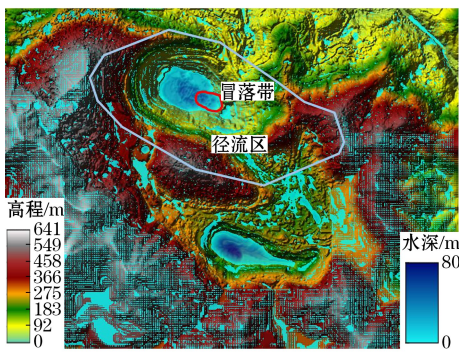


图 13　降雨入渗区划分

Fig.13　Division of rainfall infiltration area

圈定好各降雨入渗区范围后，参考相关规范对入渗系数和径流系数进行取值。入渗系数和径流系数是影响降雨入渗量估算准确性的重要参数，不同的分带区域应采用不同的入渗系数。根据《冶金矿山采矿设计规范》(GB 50830—2013)中的有关规定(见表 1)，并考虑一定的安全储备，冒落带区域入渗系数取 0.4，导水裂隙带径流系数取 0.3。径流区的径流系数则根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中的相关规定取 0.6。各分带区域范围、入渗系数及径流系数确定后，利用式(6)计算现状条件下塌陷区降雨入渗量，计算结果见表 2。

表 1　崩落区暴雨入渗系数参考值

Table 1　Reference values for rainstorm infiltration coefficients in caving area

岩(土)层破坏程度及特征	矿体上部覆盖(土)特征		设计频率暴雨入渗系数
冒落带未扩展到地表，仅导水裂隙带扩展到地表。	无塑性隔水土层	脆性岩石	0.20～0.15
		塑性岩石	0.15～0.10
	有塑性隔水土层，厚度/m	5～10	0.10～0.05
		11～20	≤0.05
矿体顶部覆岩不重复塌陷	无塑性隔水土层	脆性岩石	0.35～0.30
		塑性岩石	0.30～0.20
	有塑性隔水土层，厚度/m	5～10	0.20～0.15
		11～20	0.15～0.10
		21～30	0.10～0.05
		31～50	≤0.05
矿体顶部覆岩重复塌陷	无塑性隔水土层	脆性岩石	0.40～0.30
		塑性岩石	0.30～0.25
	有塑性隔水土层，厚度/m	5～10	0.25～0.20
		11～20	0.20～0.15
		21～30	0.15～0.10
		31～50	0.10～0.05

注：塑性岩石一般指页岩、泥灰岩、泥质砂岩、凝灰岩、千枚岩等；脆性岩石一般指石灰岩、白云岩、大理岩、花岗岩、片麻岩、闪长岩等；塑性隔水土层系指第四系黏土、亚黏土和严重风化成土状物的基岩。对于设计频率暴雨入渗系数波动值，深厚比大时取小值；深厚比小时，导水裂隙或冒落带刚波及到地表时取大值。

表 2 现状条件下径流入渗总量计算结果

Table 2 Calculation results of total runoff infiltration under current condition

区域	面积/m^2	入渗系数	径流系数	入渗量/(m^3/d)
冒落带	42 000	0.4	—	7 299
径流区	1 683 692	0.4	0.6	175 575
总区域	1 725 692	—	—	182 874

由表 2 可知,现状条件下冒落带区域总降雨入渗量为 7 299 m^3/d,径流区降雨汇集到冒落带并入渗的量为 175 575 m^3/d,占总入渗量的 96%,远大于冒落带区域直接入渗量,这表明径流区面积划分精确。

4.2 开采完毕条件下塌陷区降雨入渗量预测

与 4.1 节类似,为计算开采完毕条件下塌陷区降雨入渗量,首先确定北一采区开采完毕后冒落带以及导水裂隙带的范围。兰舟等[17]在石碌铁矿露天转地下开采地表塌陷范围预测分析研究中,开展了不同开采境界下塌陷变形数值计算,得出不同开采境界下地表变形情况并划分了地表变形区范围,如图 14 所示。本节在该模拟结果的基础上,开展了北一采区开采完毕后冒落带及导水裂隙带范围的划分工作。

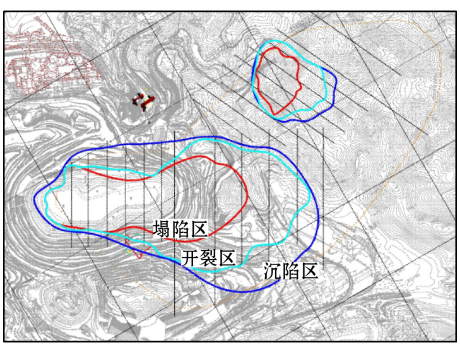


图 14 开采结束后地表塌陷区和崩落区范围

Fig.14 Range of surface subsidence area and caving area after mining

塌陷区范围设为冒落带区域,面积约为 416 537 m^2,开裂区范围设为导水裂隙带,面积约为 353 112 m^2,则径流区范围约为 956 043 m^2,各降雨入渗区范围如图 15 所示。冒落带区域入渗系数取 0.4,导水裂隙带径流系数取 0.3,径流区径流系数取 0.6。降雨 72 h 后,采坑内积水深度及规模已较为显著,积水通过塌陷变形区向地下采场下渗,选取典型剖面(剖面 1 位置见图 15)观察采坑内积水深度分布情况,如图 16 所示。由图 16 可知,积水绝大部分集中于冒落带范围内,地表径流全向冒落带汇集,并进一步入渗,因此径流区入渗系数可取冒落带区域入渗系数,即取 0.4。

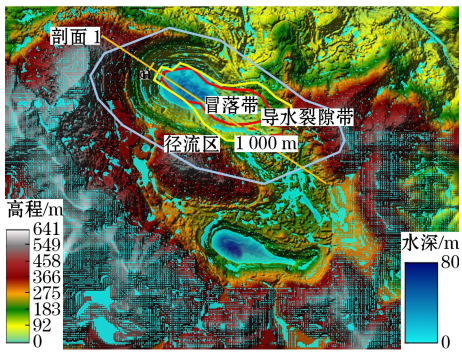


图 15 降雨入渗区划分及典型剖面位置

Fig.15 Division of rainfall infiltration area and location of typical profiles

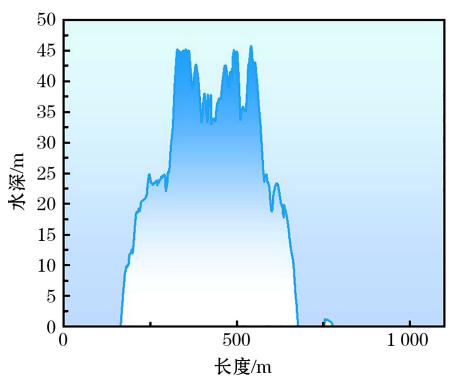


图 16 积水深度分布情况

Fig.16 Distribution of waterlogging dopth

各分带区域范围、入渗系数以及径流系数确定后,利用式(6)计算现状条件下塌陷区降雨入渗量,计算结果见表 3。

表 3 开采完毕条件下径流入渗总量计算结果

Table 3 Calculation results of total runoff infiltration under mining completion condition

区域	面积/m^2	入渗系数	径流系数	入渗量/(m^3/d)
冒落带	416 537	0.4	—	72 394
导水裂隙带	353 112	0.3	—	46 028
径流区	956 043	0.4	0.6	99 696
总区域	1 725 692	—	—	218 118

由表 3 可知,冒落带区域面积占总区域的 24.1%,降雨入渗量为 72 394 m^3/d,占总入渗量的 33.2%。导水裂隙带区域面积占总区域的 20.5%,降雨入渗量为 46 028 m^3/d,占总入渗量的 21.1%。径流区降雨汇集到冒落带的入渗量为 99 696 m^3/d,占总

入渗量的 45.7%。与北一采场当前开采岩移状态相比,冒落带区域面积增长了 891.8%,新增导水裂隙带区域面积为 353 112 m^2,总降雨入渗量增长了 19.3%。因此,地下开采导致地表变形会大幅增加塌陷变形区降雨入渗量。

4.3 地表塌陷区径流灾害防治措施

根据地表变形、地表淹没范围及时间特征,将地表塌陷区分为 3 个防渗等级进行分区域防渗,具体分级和防渗措施见表 4。一级防渗区域为冒落带及导水裂隙带被积水淹没区域,二级防渗区域为冒落带未被积水淹没区域,三级防渗区域为导水裂隙带未被积水淹没区域。不同防渗区域采用不同的防渗措施,一级和二级防渗区域采用分层填充地裂缝的方式进行地表水防渗,即通过钻孔向岩层或土体分批分层注入水泥浆、化学浆液等材料,浆液在压力作用下渗透、填充岩土裂隙,凝固后形成连续防渗体。此外,可在一级防渗区额外铺设防渗膜,并通过抽水机抽排方式来减少地表水的渗漏。三级防渗区域采用直接填充地裂缝的方式进行地表水防渗,同时在塌陷区边界构建环形截水系统,通过土质围堰与排水明渠组合施工,实现地表径流的定向导流,有效阻断外部水源汇入塌陷区域。

表 4 防渗等级划分及防渗措施

Table 4 Anti-seepage grade division and anti-seepage measures

防渗区域划分	防渗等级	防渗措施
冒落带及导水裂隙带被积水淹没区域	一级防渗区域	(1) 分层填充地裂缝; (2) 铺设防渗膜; (3) 抽水机抽排。
冒落带未被积水淹没区域	二级防渗区域	分层填充地裂缝
导水裂隙带未被积水淹没区域	三级防渗区域	直接填充地裂缝
补充防渗措施		塌陷区边界构建环形截水系统

5 结论

(1) 本文提出了一种基于地表汇水入渗区精确划分的降雨入渗量计算方法,综合现场勘察、数值计算及 HEC-RAS 汇水模拟等手段,划分了不同开采进程下冒落带、导水裂隙带以及径流区的范围,不同降雨入渗区选取不同的降雨入渗系数,并以此得出地表塌陷区降雨入渗量计算公式。

(2) 利用无人机倾斜摄影数据建立了石碌铁矿地表高精度 DEM 模型,基于此模型进行了暴雨条件下地表汇水模拟,得到了矿区地表塌陷区汇水情况。降雨 36 h 时,北一采场最大积水深度为 34.2 m,积水面积为 192 654 m^2。降雨 72 h 时,北一采场最大积水深度为 45.7 m,积水面积为 207 536 m^2,同时圈定出塌陷区周围汇水区域面积为 1 725 692 m^2。

(3) 北一采场开采完毕状态下的塌陷区降雨入渗量为 218 118 m^3/d,与北一采场现状条件下的塌陷区降雨入渗量(182 874 m^3/d)相比,塌陷区总降雨入渗量提高了 19.3%。研究结果可为矿山排水系统的设计及突水灾害的预防提供科学依据。

(4) 为减轻地表塌陷区径流入渗危害,提出了防渗措施建议。将地表塌陷区分为 3 个防渗等级进行分区域防渗,对于冒落带及导水裂隙带被积水淹没的区域(一级防渗区域),采用分层填充地裂缝、铺设防渗膜及抽水机抽排的综合防渗措施;对于冒落带未被积水淹没的区域(二级防渗区域),采用分层填充地裂缝防渗措施;对于导水裂隙带未被积水淹没的区域(三级防渗区域),采用直接填充地裂缝的措施。

参考文献(References):

[1] 杨天鸿,师文豪,李顺才,等.破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J].煤炭学报,2016,41(7):1598-1609.
Yang Tianhong, Shi Wenhao, Li Shuncai, et al. State of the art and trends of water-inrush mechanism of nonlinear flow in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(7):1598-1609.

[2] 师文豪,杨天鸿,常宏,等.中关铁矿工作面顶板突水机理及防治对策[J].采矿与安全工程学报,2016,33(3):403-408.
Shi Wenhao, Yang Tianhong, Chang Hong, et al. Water-inrush mechanism and countermeasure for the roof of working face in Zhongguan iron mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(3):403-408.

[3] 唐宇.程潮铁矿采场突水突泥致灾因素分析与防治研究[D].武汉:武汉科技大学,2019.
Tang Yu. Analysis and prevention of the disaster caused by water inrush and mud gushing in the stope of Chengchao Iron Mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2019.

[4] 付建新,谭玉叶,宋卫东.崩落法开采塌陷区上覆黄土层降雨入渗机理研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):349-353+366.

Fu Jianxin, Tan Yuye, Song Weidong. Study on mechanism of rainfall infiltration through overlying loess formation on block caving collapse area[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2015,44(2):349-353+366.

[5] 李光耀,刘兆龙,冯嵩,等.强降雨条件下单层土质覆盖层的入渗解析解及斜坡稳定性分析[J/OL].岩土工程学报:1-10[2025-05-15]. https://ink. cnki. net/urlid/32. 1124. TU. 20240718.1221.005.

Li Guangyao, Liu Zhaolong, Feng Song, et al. Analytical solution for infiltration into single-layer cover under heavy rainfall events and its application for slope stability analysis [J/OL]. Journal of Geotechnical Engineering:1-10[2025-05-15]. https://ink. cnki. net/urlid/32. 1124. TU. 20240718. 1221.005.

[6] 范明星,任高峰,吴文博,等.基于降雨量数据的程潮铁矿涌水量时序性预测模型[J].金属矿山,2024(6):212-219.

Fan Mingxing, Ren Gaofeng, Wu Wenbo, et al. Temporal prediction model of water Inflow in Chengchao Iron Mine based on rainfall data[J]. Metal Mine,2024(6):212-219.

[7] Zhan L T, Qiu Q W, Xu W J. Analytical solution for infiltration and deep percolation of rainwater into a monolithic cover subjected to different patterns of rainfall [J]. Computers and Geotechnics,2016,77:1-10.

[8] Feng S, Huang R H, Zhan L T, et al. Semi-analytical solution of pore-water pressure in unsaturated ground and infinite slope considering highly nonlinear soil hydraulic properties [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 164: 105795.

[9] 蔚波,王皓,尚宏波.煤层过沟开采覆岩破坏特征及地表水入渗规律研究[J].煤矿安全,2022,53(6):161-168.

Yu Bo, Wang Hao, Shang Hongbo. Study on overburden failure characteristics and surface water infiltration law of coal seam mining through gully[J]. Safety in Coal Mines, 2022,53(6):161-168.

[10] Paronuzzi P, Fedrigo D, Bolla A. Rainfall infiltration through stratified colluvial deposits: analytical approach vs. numerical modelling[J]. Geosciences,2024,14(2):53.

[11] 李军强,王肖珊,丛宇,等.基于 Visual MODFLOW 大水矿山深部开采矿坑涌水量预测[J].金属矿山,2024(10):257-264.

Li Junqiang, Wang Xiaoshan, Cong Yu, et al. Prediction of water inflow in deep mining of large water mine based on Visual MODFLOW[J]. Metal Mine, 2024(10):257-264.

[12] 刘敏,冯学茂,赵炼恒,等.一种可预测非饱和土壤中入渗和汇水的水力耦合模型(英文)[J].Journal of Central South University,2023,30(10):3435-3449.

Liu Min, Feng Xuemao, Zhao Lianheng, et al. A hydro-mechanical coupling model for predicting infiltration and ponding in unsaturated soils[J]. Journal of Central South University,2023,30(10):3435-3449.

[13] 熊鹏,谢永生,韩冬,等.基于 Visual Modflow 的刚果(金)迪兹瓦露天矿地下涌水量预测[J].科学技术与工程,2022,22(28):12324-12330.

Xiong Peng, Xie Yongsheng, Han Dong, et al. Prediction of underground water inflow in Deziwa open-pit mine in the democratic republic of Congo (DRC) based on Visual Modflow[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(28):12324-12330.

[14] 侯晓萍,樊恒辉.基于 COMSOL Multiphysics 的非饱和裂隙土降雨入渗特征研究[J].岩土力学,2022,43(2):563-572.

Hou Xiaoping, Fan Henghui. Study on rainfall infiltration characteristics of unsaturated fractured soil based on COMSOL Multiphysics[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(2):563-572.

[15] Liu Yilong, Yang Tianhong, Zhao Yong, et al. Characteristics of strata movement and method for runoff disaster management for shallow multiseam mining in gully regions: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2023,172:105608.

[16] 杨天鸿,杨斌,徐曾和,等.矿山采动岩体非线性渗流试验、模型与工程应用[M].北京:冶金工业出版社,2021.

Yang Tianhong, Yang Bin, Xu Zenghe, et al. Experiment, modelling and engineering application of non-linear flow in mining-disturbed rock mass [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2021.

[17] 兰舟,张艺山,石露,等.石碌铁矿露天转地下开采地表塌陷范围预测分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):45-52.

Lan Zhou, Zhang Yishan, Shi Lu, et al. Prediction and analysis on surface subsidence range in the open-pit to underground mining of Shilu Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):45-52.